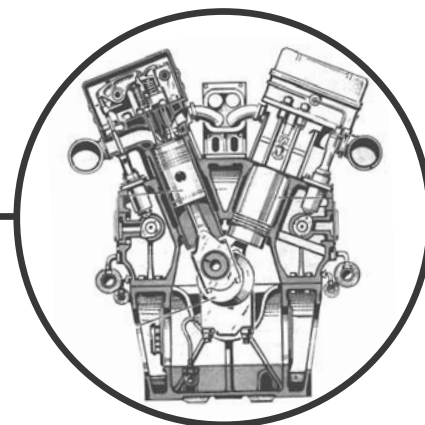


ЕНЕРГЕТИКА



DOI 10.15589/jnn20160107

УДК 621.454

М66

GAS INPUT DEVICES IN THE FUEL TANKS OF THE LIQUID ROCKET ENGINES. DESIGN APPROACHES. MODERN CLASSIFICATION

ГАЗОВВОДЫ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ЖИДКОСТНО-РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ. СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

Yuriy A. Mitikov

mitikov@yandex.ua

ORCID: 0000-0002-9923-0433

Yefim Y. Lyubarskiy

fima1995@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3840-337X

Ю. А. Митиков

канд. техн. наук, доц.

Е. Ю. Любарский

студ.

Oles Gonchar Dnipropetrovsk National University, Dnipropetrovsk

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, г. Днепропетровск

Abstract. Advanced theoretical and experimental material on the use of various designs of the devices of the pressurization gas input in the carrier rocket fuel tanks has been analyzed and summarized. Major problems of designing these devices are formulated regarding the high-temperature (generator) gas pressurization. First, it is the gas pressure undershoot in a tank at the carrier rocket start time, as well as overheating of the upper bottom of the tank by the end of the power plant operation. Certain simple designs solving the issues in the most typical cases are described. Taking into account the obtained results, the classification of the gas input devices in the fuel tanks of the carrier rocket power plants has been further developed. It provides designers with the greatest insight possible to the capabilities and special features of the gas input into the tanks. The further ways of improving these devices are already outlined. The devices suggested in the classification make one optimistic about the prospect of using of a generator gas at even higher temperatures up to 1500–1800 K.

Keywords: devices of the pressurization gas input into the tank; high-temperature pressurization; gas pressure undershoot; overheating of the upper bottom of the tank; classification.

Аннотация. Проанализирована проблематика проектирования современных устройств ввода газа наддува в баки. Проведен анализ типичных конструкций этого класса. Получила дальнейшее развитие классификация газовводов топливных баков с учетом современных достижений. Намечены пути совершенствования данных устройств.

Ключевые слова: устройства ввода газа наддува в баки; высокотемпературный наддув; провал давления газа, перегрев верхнего днища бака, классификация.

Анотація. Проаналізовано проблематику проектування сучасних пристроїв введення газу наддування в баки. Проведено аналіз типових конструкцій цього класу. Отримала подальший розвиток класифікація газовводів паливних баків з урахуванням сучасних досягнень. Намічено шляхи вдосконалення даних пристроїв.

Ключові слова: пристрої введення газу наддування в баки; високотемпературне наддування; провал тиску газу; перегрів верхнього днища бака; класифікація.

REFERENCES

- [1] Mitikov Yu. A., Ostashev L. A., Moseyko V. A. *Ustroystvo dlya nadduva toplivnogo baka* [Device for fuel tank pressurization] A.S. № 148930. MKI V64 D37/24. №2267719/23; stat. 23.11.79.
- [2] Mitikov Yu. A., Moseyko V. A., Ostashev L. A. *Ustroystvo dlya nadduva toplivnogo baka goryachim gazom* [Device for fuel tank pressurization with hot gas] A.S. № 190290 SSSR, MKI B64D 37/24. № 3049595; stst. 06.09.82; publ. 05.07.83. 4 p.
- [3] Belyaev N. M. *Sistemy nadduva toplivnykh bakov raket* [Pressurization systems of rocket fuel tanks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 335 p.
- [4] Degtyarev A. V., Kushnarev A. P., Popov D. A. *Raketa kosmicheskogo naznacheniya sverkhmalogo klassa* [Space mission rocket of the ultra-low class]. *Kosmicheskaya tekhnika. Raketnoe vooruzhenie: sb. nauch.-tekhn. st. GKB «Yuzhnoe» — Space technology. Missiles: collection of scientific and engineering articles SDO «Yuzhnoe»*, 2014, issue 1, pp. 14–20.
- [5] Kozlov A. A., Novikov V. N., Solovov Ye. V. *Sistemy pitaniya i upravleniya zhidkostnykh raketnykh dvigatelnykh ustanovok* [Power supply and control systems for liquid-propellant rocket power plants]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 352 p.
- [6] Logvinenko A. I. *Perspektivy razvitiya pnevmogidravlicheskiykh sistem sovremennykh raket-nositeley*. [Development prospects pneumatic-hydraulic systems modern boosters]. *Kosmicheskaya tekhnika. Raketnoe vooruzhenie: sb. nauch.-tekhn. st. GKB «Yuzhnoe» — Space technology. Military rocketry: collection of scientific and technical articles SDO «Yuzhnoe»*, 2007, issue 2, pp. 37–42.
- [7] Mitikov Yu. A., Kuda S. A. *Opreделение koeffitsientov stesneniya dlya neizotermicheskikh turbulentnykh struy* [Determination of constraint coefficients for nonisothermal turbulent jets]. *Sb. AN USSR. In-t tekhn. mekhaniki: Proektirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem. — Collection of Ukrainian Academy of Sciences. Institute of Engineering Mechanics: Design of complex technical systems*, 1989, pp.153–155.
- [8] Mitikov Yu. A., Sviridenko N. F. *Problemy ispolzovaniya vysokotemperaturnogo gaza dlya nadduva toplivnykh bakov dvigatelnykh ustanovok novogo pokoleniya i puti ikh resheniya* [Problems of using a high temperature gas for pressurization of the fuel tanks of the new generation engine units and their solutions]. *Tekhnichna mekhanika — Technical mechanics*, 2013, issue 1. pp. 68–77.
- [9] Mitikov Yu. O., Ivanitskiy G. M. *Raschet parametrov sistemy nadduva s uchetom vzaimodeystviya strui gaza s komponentom topliva* [Calculation of the pressurization system parameters with consideration of the interaction of the gas jet with the fuel component] *Kholodylna tekhnika i tekhnologiya — Refrigeration equipment and technology*, 2012, issue 2. pp. 46–50.
- [10] Mitikov Yu. O., Polyakov M. V. *Rekomendatsii po proektuvannyu gazovvodiv bakiv velikogo podovzhenniya* [Recommendations for designing gas input devices for tanks with big extension]. *Zbirnyk naukovykh prats Kh-UPS — Collection of scientific publications of KUAF*, 2012. issue 2 (31). pp. 118–121.
- [11] Moseyko V. A., Mitikov Yu. A. *Modelirovanie vnutribakovykh protsessov dvigatelnykh ustanovok raket-nositeley* [Modelling of innertank processes of the carrier rocket power plants]. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of engine technology], 2015, issue 1. pp. 45–49.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Последние десятилетия благодаря успехам в области электроники и энергетики (аккумуляторы) наблюдается существенная миниатюризация спутников. Время их активной работы уже приближается к 20 годам. Ракеты носителей (РК) среднего класса сегодня в состоянии одновременно выводить такие спутники на орбиты десятками. В связи с этим, несмотря на рост потребностей в космических технологиях среднее количество запусков носителей всеми странами мира за последние годы достаточно стабильно и находится в среднем в пределах восьмидесяти в год.

Особенностью настоящего времени является и то, что на рынок пусковых услуг вышли неправи-

тельные коммерческие организации ряда государств, и, в первую очередь, США и Китая. Частные инвесторы сегодня реализуют амбициозные космические проекты, генерирующие прибыль. В большинстве промышленно развитых стран созданы национальные космические агентства. Неудивительно, что ценовая конкуренция за оказание пусковых услуг в мире постоянно возрастает. Не видно причин, чтобы она не росла и далее.

Именно на экономическую эффективность принимаемых технических решений, на создание принципиально новых образцов ракетно-технической техники в первую очередь нацеливает ученых и конструкторов Украины «Общегосударственная

целевая научно-техническая космическая программа на 2013–2017 годы». В связи с вышеуказанным в ракетно-технической технике сегодня интенсивно пересматриваются подходы, сложившиеся ранее, когда правительства ряда стран стремились выйти в космос любой ценой (за бюджетные средства) ради достижения политических целей.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Системы наддува (СН) топливных баков жидкостно-ракетных двигателей (ЖРД) входят в состав пневмогидравлических систем РН и являются их наиболее сложными и дорогими частями после современных двигателей [4]. В ряду множества факторов [11], влияющих на параметры СН, отдельно стоят условия ввода газа наддува в свободные объемы баков [8]. Под ними понимают способ, скорость и направление ввода газа. Этот фактор фактически является единственным, на который у разработчика СН существует реальная степень влияния [6]. Известен ряд оптимистичных экспериментальных данных [5, 6, 8, 11] о том, что оптимизация условий ввода газа наддува в баки может позволить сэкономить до 30% массы рабочего тела наддува, а значит — и массы конструкции всей СН.

Анализ технической литературы, посвященный исследованиям влияния условий ввода неизоэнтальпического газа наддува (достигнут диапазон температур 40–1300 К) в баки, показывает следующее. К середине семидесятых годов прошлого столетия первый обзор наиболее типовых конструкций устройств ввода газа в баки (газоводы) приведен в [3], однако, рекомендации по выбору конструкций для конкретных условий в ней отсутствуют. В [6] обобщается большой накопленный опыт двигателестроения к началу двухтысячных годов, существенно расширена классификация газоводов, приведены обоснованные предложения для использования некоторых типов конструкций для конкретных условий. Однако для наиболее перспективных СН цилиндрических баков большого удлинения (баки окислителя первых ступеней), а именно высокотемпературных генераторных, вопрос остается открытым и сегодня.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработать современную классификацию газоводов топливных баков двигателей установок РН на основе анализа и обобщения самого современного теоретического и экспериментального материала, предложить конкретные простые конструкции для наиболее типичных случаев, наметить дальнейшие пути совершенствования этих устройств.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Одной из основных проблем проектирования газоводов перспективных высокотемпературных СН

является одновременное выполнение ими взаимноисключающих требований [8]. Устройства должны способствовать поддержанию потребного давления газа в баках, при этом не допускать:

- заметный провал давления газа в баках в первые секунды работы двигательной установки (ДУ);
- перегрев толстостенных несущих алюминиевых верхних днищ баков.

Ситуация существенно осложняется тем, что газоводы должны быть размещены в минимальных начальных газовых объемах баков. Выходные сечения устройств ввода газа на момент запуска ДУ находятся в непосредственной близости от свободной поверхности топлива. А именно запуск двигателя является его наиболее сложным периодом работы. В состав же генераторного газа входит до 95% паров топлива. При вводе такого газа с заметной скоростью в направлении топлива может происходить его дробление [9–10]. Это обуславливает большие тепловые и массовые потери газа наддува [9]. При вводе высокотемпературного газа в длинные баки первых ступеней с небольшой скоростью к концу работы ДУ наблюдается ярко выраженная температурная стратификация газа в свободном объеме. Это прямой путь к нагреву верхнего днища бака выше допустимых температур.

Исторически повышение температуры газа наддува на входе в баки происходило постепенно. Соответственно, описанные эффекты нарастали и достигли пика своей остроты при использовании генераторного газа с рекордной температурой ~1300 К.

Для шарообразных топливных баков (подвесных) и баков небольшого удлинения (вторые и третьи ступени) при использовании газа наддува с небольшой температурой широко применялись так называемые радиальные газоводы. С их помощью организовывали ввод газа наддува с небольшой скоростью преимущественно вдоль свободной поверхности топлива в баках [6].

Для цилиндрических топливных баков первых ступеней рекомендовались так называемые осевые газоводы, которые вводят газ наддува вдоль продольной оси бака. Одна из интересных простых конструкций, использующая эффект эжекции [5], приведена на рис. 1, а). Наличие внешней трубы приводит к определенной регулировке дальности струи, что по итогам обширных экспериментальных исследований рекомендуется для баков малых удлинений (отношение длины бака к его диаметру ~ 0,8).

Для снижения интенсивности взаимодействия струи газа с поверхностью топлива также известно устройство с плавающим отражателем [8], которое в нужный момент уводит отражатель в сторону и не мешает струе распространяться вдоль продольной оси бака (рис. 1, б).

При переходе на высокотемпературный газ возникла идея жения о создании двухрежимных газов-

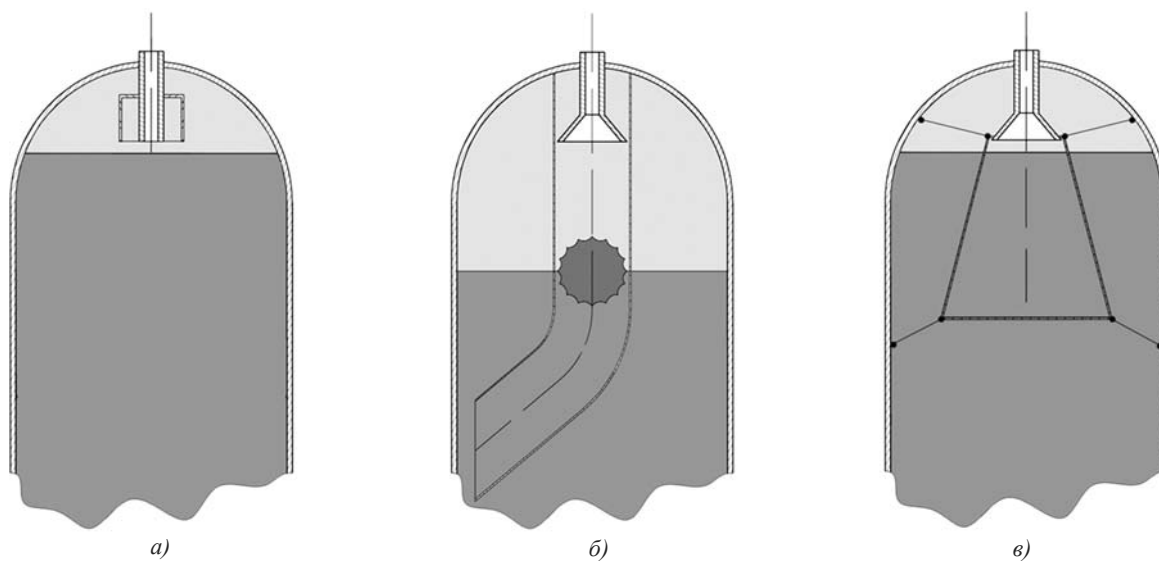


Рис. 1. Принципиальные схемы новых устройств ввода

водов [6–8]. Действительно, логично вначале работы ДУ газ наддува вводить вдоль свободной поверхности топлива, а после опускания уровня на определенную величину переключать на ввод вдоль продольной оси бака [4]. Время переключения устройства предлагается определять по величине критической безразмерной вязкости $M_{кр} = We^3 / M_{ж}^4$ или критическому числу Вебера $We_{кр}$ для дробления жидкости [2].

Для практических расчетов в условиях ярко выраженной нестационарности внутрибаковых процессов может быть предложен и более простой подход к определению времени переключения. Он связан с величиной скорости газа наддува на оси струи, которая существенно легче в определении. Когда величина этой скорости становится равной фоновой скорости в баке (величина скорости опускания уровня топлива в баке), тогда считается, что взаимодействие струи с топливом прекращается, и устройство можно переключать. К настоящему времени внедренных двухрежимных устройств нам не известно.

Дальнейшие исследования [7] показали, что для баков большого удлинения дальнобойность горячей турбулентной струи ограничена стесняющим действием конструкции бака всего лишь 1,5–2,0 его калибрами. Другими словами, перемешивание газа во всем свободном объеме бака свободной струей с любой осевой скоростью ввода невозможно выполнить. Соответственно, и газ у верхнего днища бака будет заметно перегрет относительно его среднеобъемной температуры. Решить задачу в полном объеме для баков большого удлинения, характерного для баков первых ступеней РН, усложнением устройства ввода не представляется возможным.

Для определенной компенсации указанного негативного факта стеснения предлагается конструкция,

использующая эффект настипания струи на поверхность [1]. В этом случае скорость струи по ее оси увеличивается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению со свободной. Реализация ее максимально проста (рис. 1, в).

Экспериментальный факт о том, что в объеме, ограниченном ~ 1 калибром бака, возможно перемешать газ и оптимум скорости существует, послужил основой для создания многоуровневых газоводов [10]. Идея их понятна — выходные сечения газоводов надо располагать приблизительно через один калибр бака по всей его высоте и подключать в работу по времени работы ДУ последовательно один после другого. Повышенных требований по герметичности к переключателю в этом случае не предъявляется.

Принципиально новым взглядом на способ ввода газа наддува в баки является использование для этих целей турбулентных вихревых колец (ТВК) [8], которые обладают интересным свойством — при небольшой скорости ввода (до 10 м/с) совершенно в незначительной степени подсасывают газ окружающей среды и не подвержены влиянию стеснения конструкцией бака (в рассматриваемых пределах). При вводе ТВК в бак с частотой 10–20 гц наступает режим каналирования — кольца движутся как будто в трубе, в силу чего распространяются на большие расстояния и не оказывают негативного влияния на температуру поверхности топлива. Такой способ ввода газа приемлем для топливных баков любого удлинения [8], он позволяет использовать генераторный газ с температурой до 1800 К.

В настоящее время ведутся поиски простых и надежных устройств генерации вихревых колец в условиях виброперегрузок, характерных для полетных режимов эксплуатации. Конечным результатом проведенных изысканий является современная

классификация устройств ввода газа в топливные баки ДУ РН, представленная на рис. 2, где затененные прямоугольники являются впервые введенными решениями в классификацию устройств ввода газа наддува в баки.

ВЫВОДЫ. 1. Проанализирован и обобщен современный теоретический и экспериментальный материал по использованию различных типов конструкций устройств ввода газа наддува в баки ДУ РН.

2. Сформулированы основные проблемы проектирования этих устройств применительно к перспективному высокотемпературному (генераторному) газу наддува. Это, в первую очередь, возможность провала давления газа в баке в начальный момент полета РН и перегрева верхнего днища бака к концу работы ДУ.

3. Описаны конкретные простые типы конструкций для решения ряда возникающих проблем в наиболее типичных случаях.

4. С учетом полученных результатов получила дальнейшее развитие классификация газопроводов топливных баков ДУ РН, которая позволяет максимально широко взглянуть на проблему при проектировании системы питания ДУ. Намечены дальнейшие пути совершенствования этих устройств. Предложенные в классификации устройства дают возможность оптимистично смотреть на перспективу использования генераторного газа с еще более высокой температурой до 1500–1800 К.

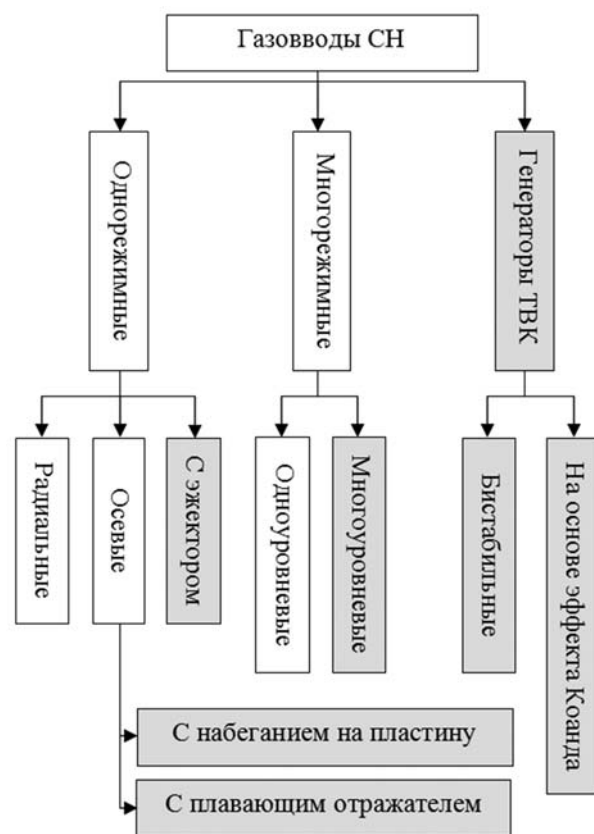


Рис. 2. Современная классификация устройств ввода газа наддува в баки

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А.С. №148930. МКИ В64 D37/24. Устройство для наддува топливного бака [Текст] / Ю. А. Митиков, Л. А. Осташев, В. А. Мосейко. — № 2267719/23; заявл. 23.11.79.
- [2] А.С. № 190290 СССР, МКИ В64D 37/24. Устройство для наддува топливного бака горячим газом [Текст] / Ю. А. Митиков, В. А. Мосейко, Л. А. Осташев. — № 3049595; заявл. 06.09.82; опубл. 05.07.83. — 4 с.
- [3] **Беляев, Н. М.** Системы наддува топливных баков ракет [Текст] / Н. М. Беляев. — М. : Машиностроение, 1976. — 335 с.
- [4] **Дегтярев, А. В.** Ракета космического назначения сверхмалого класса [Текст] / А. В. Дегтярев, А. П. Кушнарв, Д. А. Попов // Космическая техника. Ракетное вооружение : сб. науч.-техн. ст. ГKB «Южное». — 2014. — № 1. — С. 14–20.
- [5] **Козлов, А. А.** Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок [Текст] / А. А. Козлов, В. Н. Новиков, Е. В. Соловьев. — М. : Машиностроение, 1988. — 352 с.
- [6] **Логвиненко, А. И.** Перспективы развития пневмогидравлических систем современных ракет-носителей. [Текст] / А. И. Логвиненко // Космическая техника. Ракетное вооружение : сб. науч.-техн. ст. ГKB «Южное». — 2007. — № 2. — С. 37–42.
- [7] **Митиков, Ю.А.** Определение коэффициентов стеснения для неизотермических турбулентных струй [Текст] / Ю. А. Митиков, С. А. Куда // сб. АН УССР. Ин-т техн. механики: Проектирование сложных технических систем. К. : Наукова думка, 1989. — С. 153–155.
- [8] **Митиков, Ю. А.** Проблемы использования высокотемпературного газа для наддува топливных баков двигательных установок нового поколения и пути их решения [Текст] / Ю. А. Митиков, Н. Ф. Свириденко // Технічна механіка. — 2013. — № 1. — С. 68–77.
- [9] **Митиков, Ю. О.** Расчет параметров системы наддува с учетом взаимодействия струи газа с компонентом топлива [Текст] / Ю. А. Митиков, Г. М. Иваницкий // Холодильна техніка і технологія. — 2012. — № 2. — С. 46–50.

- [10] **Мітіков, Ю. О.** Рекомендації по проектуванню газоводів баків великого подовження / Ю. О. Мітіков, М. В. Поляков // Збірник наукових праць ХУПС. — 2012. — Вип. № 2 (31). — С. 118–121.
- [11] **Мосейко, В. А.** Моделирование внутрибачковых процессов двигательных установок ракет-носителей / В. А. Мосейко, Ю. А. Митиков // Вестник двигателестроения. — 2015. — № 1. — С. 45–49.

© Ю. О. Мітіков, Ю. Ю. Любарський

Надійшла до редколегії 28.01.2016

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук, проф. *С. О. Давидов*